

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Matija Pisk**

Zagreb, 2019. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Božidar Matijević, dipl. ing.  
Dr. sc. Ivan Kumić, dipl. ing.

Student:

Matija Pisk

Zagreb, 2019. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Božidaru Matijeviću na pomoći oko izrade ovog završnog rada. Zahvaljujem se asistentima Matiji Sakomanu, Tamari Aleksandrov Fabijanić, suradniku Irbasu Škrinjariću kao i laborantu Ivanu Martinku na pomoći u ispitivanju mehaničkih svojstava. Također se zahvaljujem laborantu Ivanu Vovku na iznimnoj pomoći oko metalografske analize. Zahvaljujem se Mariji Škrlec i Tomislavu Solini na pomoći u lektoriranju rada.

Posebno bih se zahvalio asistentu, mentoru i prijatelju Ivanu Kumiću na pomoći, suradnji i druženju, koji je svojim izuzetnim karakterom i naporim radom inspiracija svima.

Matija Pisk



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Matija Pisk**

Mat. br.: 0036475455

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje trošenja alata kod obrade čelika za izradu prstenova kotrljajući ležaja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Examination of the tool wear on machining of steel of the bearing rings**

Opis zadatka:

Prilikom izrade prstenova kotrljajućih ležajeva najčešće se primjenjuju čelici kvalitete 100 Cr6, 80CrMn4 ili 100 CrMnS6-4. Sama izrada prstenova provodi se na različitim tokarilicama uz primjenu različitih oblika i kvaliteta reznih pločica. Kako se radi o veliko serijskoj ili masovnoj proizvodnji prstenova kotrljajućih ležajeva to je i potrošnja reznih pločica također velika. Stog razloga je svakako važno odabirom kvalitetnih pločica utjecati na troškove izrade prstenova kotrljajućih ležajeva. Kako danas na tržištu imamo različite proizvođače reznih pločica različitih kvaliteta (sastava osnovnog materijala, prevučene različitim slojevima) potrebno je prateći trošenje reznih pločica odabrati i preporučiti reznju pločicu.

U ovom radu potrebno je na istrošenim reznim pločicama usporedbom novih i istrošenih reznih pločica zaključiti o trošenju pločica. Na SEM mikroskopu ispitati iskorištene pločice te utvrditi da li se opravdano mijenjaju pločice, te kolika je stvarna potrošenost reznih osštica. Primjenom kalotestera izmjeriti debljinu prevlake te usporediti sa specifikacijama proizvođača. Metalografskim ispitivanje poprečnog presjeka provjeriti osnovni materijal kao i vrste prevlaka na reznim pločicama.

Zadatak zadan:

29. studenog 2018.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Božidar Matijević

Rok predaje rada:

**1. rok:** 22. veljače 2019.

**2. rok (izvanredni):** 28. lipnja 2019.

**3. rok:** 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:

**1. rok:** 25.2. - 1.3. 2019.

**2. rok (izvanredni):** 2.7. 2019.

**3. rok:** 23.9. - 27.9. 2019.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof.dr.sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. Uvod .....	1
2. Obrada odvajanjem čestica .....	2
3. Materijali reznog alata .....	6
3.1. Tvrdi metali – (eng. <i>Cemented Carbides</i> ).....	7
3.2. PVD postupak prevlačenja.....	9
3.3. CVD postupak prevlačenja .....	10
4. Analiza kvalitete reznog alata.....	11
4.1. Mjerenje debljine prevlake kalotestom .....	12
4.2. Ispitivanje adhezivnosti prevlake prema normi VDI 3198 .....	15
4.3. Metalografska analiza .....	17
4.4. Mjerenje tvrdoće osnovnog materijala i prevlake.....	19
4.5. Mjerenje lomne žilavosti – Palmqvist metoda.....	21
5. Eksperimentalni dio .....	24
5.1. Mjerenje debljine prevlake kalotestom .....	25
5.2. Ispitivanje adhezivnosti prevlake prema normi VDI 3198 .....	27
5.3. Metalografska analiza .....	29
5.4. Mjerenje tvrdoće osnovnog materijala i prevlake.....	32
5.5. Mjerenje lomne žilavosti – Palmqvist metoda.....	37
5.6. Utvrđivanje trajnosti alata u eksploataciji.....	39
6. Zaključak .....	40
LITERATURA.....	41
PRILOZI.....	42

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Obrada odvajanjem čestica (OOČ) kao obradni sustav.....	3
Slika 2.	Tokarski stroj marke Spinner .....	4
Slika 3.	Izmjenjive rezne pločice.....	5
Slika 4.	Svojstva reznih materijala .....	6
Slika 5.	Mikrostruktura tvrdog metala WC/Co .....	7
Slika 6.	Usporedba tvrdoće i lomne žilavosti tvrdih metala i ostalih materijala .....	8
Slika 7.	Prevučene rezne pločice WC/Co .....	10
Slika 8.	Kalotester TRIBOtechnic .....	12
Slika 9.	Sučelje kuglica/uzorak .....	13
Slika 10.	Prikaz pravilnog pozicioniranja sustava prilikom testiranja kalotesterom.....	13
Slika 11.	Izračun debljine prevlake .....	14
Slika 12.	Rockwell C indenter.....	15
Slika 13.	Uređaj za mjerenje tvrdoće po Rockwellu .....	15
Slika 14.	Prikaz postupka i šest kategorija oštećenja prevlake.....	16
Slika 15.	Prikaz metalografskih uzoraka nakon rezanja.....	17
Slika 16.	Zalijevanje uzoraka u polimernu masu .....	18
Slika 17.	Mikroskop OLYMPUS GX51.....	18
Slika 18.	Tvrdomjer DUH-211 proizvođača Shimatzu, Japan .....	19
Slika 19.	Slika Berkovichevog indentora .....	20
Slika 20.	Tvrdomjer Indentec .....	21
Slika 21.	Postupak mjerenja tvrdoće .....	21
Slika 22.	Pukotine koje propagiraju iz vrhova otiska .....	23
Slika 23.	Uzorci za ispitivanje, uzorak 1 – desno, uzorak 2 - lijevo .....	24
Slika 24.	Uzorci 1 i 2, otisak kalote označen strelicama .....	25
Slika 25.	Uzorci 1 i 2 pod svjetlosnim mikroskopom, povećanje 100x .....	25
Slika 26.	Uzorci 1 i 2, mjerenje karakterističnih veličina .....	26
Slika 27.	Slika postupka utiskivanja Rockwell C metodom.....	27
Slika 28.	Vizualni pregled otiska indentora.....	27
Slika 29.	Analiza adhezivnosti prevlake uzorka 1 .....	28
Slika 30.	Analiza adhezivnosti prevlake uzorka 2.....	28
Slika 31.	Nagrižena mikrostruktura WC/Co uzorka 1, povećanje 1000x .....	29
Slika 32.	Nagrižena mikrostruktura WC/Co uzorka 2, povećanje 1000x .....	29
Slika 33.	Debljine slojeva prevlake uzorka 1 .....	30
Slika 34.	Debljine slojeva prevlake uzorka 2 .....	30
Slika 35.	Usporedba debljina prevlaka uzoraka 1 i 2 .....	31
Slika 36.	Vidljivi otisci indentora na slojevima prevlake uzorka 1 .....	32
Slika 37.	Vidljivi otisci indentora na osnovnom materijalu uzorka 1 .....	32
Slika 38.	Dijagrami sila-dubina ispitivanja slojeva prevlake uzorka 1 .....	33
Slika 39.	Dijagram sila-dubina ispitivanja osnovnog materijala uzorka 1 .....	34
Slika 40.	Vidljivi otisci indentora na slojevima prevlake uzorka 2.....	34
Slika 41.	Vidljivi otisci indentora na osnovnom materijalu uzorka 2 .....	34
Slika 42.	Dijagram sila-dubina ispitivanja slojeva prevlake uzorka 2 .....	35
Slika 43.	Dijagram sila-dubina ispitivanja osnovnog materijala prevlake uzorka 2 .....	36
Slika 44.	Usporedba tvrdoće osnovnih materijala i prevlaka .....	36
Slika 45.	Otisak indentacije Vickers, metoda Palmqvist.....	37
Slika 46.	Usporedba lomne žilavosti uzoraka 1 i 2 .....	38
Slika 47.	Usporedba trajnosti alata uzorka 1 i 2 .....	39

---

POPIS TABLICA

Tablica 1. Rezultati kalotesta .....	26
Tablica 2. Popis debljina slojeva prevlaka .....	31
Tablica 3. Vrijednosti tvrdoće gornjeg sloja prevlake uzorka 1 .....	33
Tablica 4. Vrijednosti tvrdoće donjeg sloja prevlake uzorka 1 .....	33
Tablica 5. Vrijednosti tvrdoće osnovnog materijala uzorka 1 .....	33
Tablica 6. Vrijednosti tvrdoće gornjeg sloja prevlake uzorka 2 .....	35
Tablica 7. Vrijednosti tvrdoće donjeg sloja prevlake uzorka 2 .....	35
Tablica 8. Vrijednosti tvrdoće osnovnog materijala uzorka 2 .....	35
Tablica 9. Vrijednosti lomne žilavosti osnovnog materijala uzorka 1 .....	37
Tablica 10. Vrijednosti lomne žilavosti osnovnog materijala uzorka 2 .....	37

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
d	$\mu\text{m}$	Promjer vanjskog prstena
D	$\mu\text{m}$	Promjer unutarnjeg prstena
e	$\mu\text{m}$	Debljina prevlake
R	Mm	Polumjer kuglice
Wk	$\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$	Lomna žilavost - Palmqvist
A	mm	Duljina dijagonale otiska
HV	-	Tvrdoća po Vickersu
Wg	N/mm	Omjer sile i duljine pukotina
F	N	Ispitna sila
dsr	mm	Duljina dijagonale otiska
T	mm	Ukupna duljina pukotina
l	mm	Duljina pukotine
d1	$\mu\text{m}$	Promjer vanjskog prstena
d2	$\mu\text{m}$	Promjer vanjskog prstena
D1	$\mu\text{m}$	Promjer unutarnjeg prstena
D2	$\mu\text{m}$	Promjer unutarnjeg prstena
e1	$\mu\text{m}$	Debljina prevlake
e2	$\mu\text{m}$	Debljina prevlake
esr	$\mu\text{m}$	Srednja vrijednost debljine prevlake
Fmax	N	Maksimalna sila ispitivanja
Hmax	$\mu\text{m}$	Maksimalna dubina ispitivanja



---

**SAŽETAK**

Prilikom izrade prstenova kotrljajućih ležajeva najčešće se primjenjuju čelici kvalitete 100Cr6, 80CrMn4 ili 100CrMnS6-4. Sama izrada prstenova provodi se na različitim tokarilicama uz primjenu različitih oblika i kvaliteta reznih pločica. Kako se radi o velikoserijskoj ili masovnoj proizvodnji prstenova kotrljajućih ležajeva tako je i potrošnja reznih pločica također velika. Iz tog razloga važno je odabirom kvalitetnih pločica utjecati na troškove izrade prstenova kotrljajućih ležajeva. Kako danas na tržištu imamo različite proizvođače reznih pločica različitih kvaliteta (sastava osnovnog materijala, prevučene različitim slojevima) potrebno je pratiti trošenje i analizom reznih pločica, zaključiti o kvaliteti istih.

U ovom radu provedena su ispitivanja na istrošenim reznim pločicama koje su napravljene od tvrdog metala i prevučene funkcionalnim prevlakama. Primjenom kalotestera izmjerena je debljina prevlake. Utiskivanjem i analizom otiska Rockwell C indenterom utvrđena je adhezivnost prevlake. Nanoindentacijom je određena tvrdoća osnovnog materijala i prevlake, dok je Palmqvistovom metodom određena lomna žilavost osnovnog materijala. Metalografskim ispitivanjem poprečnog presjeka provjerena je mikrostruktura osnovnog materijala te su dobiveni rezultati stavljeni u kontekst trajnosti reznog alata.

*Ključne riječi: tvrdi metali, funkcionalne prevlake, tokarenje, analiza kvalitete alata*

---

## SUMMARY

In the manufacturing of rolling bearings rings, materials like 100Cr6, 80CrMn4 or 100CrMnS6-4 are most commonly used. Bearing rings are generally manufactured using machining techniques like turning, in which cutting tools with different geometry and quality are applied. This industry being high volume production, uses large quantities of aforementioned cutting tools. By using cutting tools of different quality, it is possible to cut down on production costs in manufacturing of rolling bearing rings.

In this research, coated cemented carbide cutting tools were tested using different analytical methods. Thickness of functional coatings was measured using calotest. Coating adherence to the substrate was analysed by Rockwell C indentation. Nano-hardness was tested using the instrumented method for hardness testing, while the fracture toughness of substrate was determined by Palmqvist method. Microstructure in cross section was metallographically analysed, and all of the results were interpreted through the longevity of cutting tools in real life application.

*Key words: cemented carbides, coatings, machining turning, tool quality analysis*

## 1. Uvod

Obrada odvajanjem čestica predstavlja jednu od najzastupljenijih proizvodnih tehnologija te je u konvencionalnom pristupu proizvodnje (izuzev aditivne proizvodnje) neophodna za dobivanje konačnog oblika i dimenzija proizvoda. Jedan od zanimljivih čimbenika je upravo potrošnja reznog alata koji je neophodan u svakoj operaciji obrade odvajanjem čestica.

Tržište reznih alata u 2017. godini približilo se iznosu od 100 milijardi dolara što predstavlja porast od 10% u usporedbi s 2011. godinom [1]. Taj podatak s jedne strane svjedoči o povećanoj potrebi za reznim alatom, no s druge strane govori o velikoj količini potrošenog materijala te trošku koji takav alat unosi u proizvodnju. Naravno, spomenuti trošak je neizbježna varijabla u svakom planiranju proizvodnje, međutim, konstantnim razvojem, ispitivanjem i analizom alata, poboljšanjem proizvodne tehnologije, moguće je postići značajne uštede. Takve uštede ne samo da pozitivno djeluju na povećanje proizvodnosti, već poduzeću omogućuju formiranje konkurentnih cijena proizvoda te ulazak u proizvodnju koja do tada nije bila financijski isplativa.

U ovom završnom radu prikazan je aspekt takvog pristupa. Obrada odvajanjem čestica oslanja se na alat izrađen od prevučenog tvrdog metala. Tvrdi metal na bazi kobalta (Co) i volfram-karbida (WC) dodatno je prevučen funkcionalnim površinskom prevlakama, primjerice prevlakom titan-nitrida (TiN) koja povisuje otpornost na trošenje te povećava trajnost alata u eksploataciji.

Cilj je modernim postupcima ispitivanja, poput utvrđivanja debljine i adhezivnosti prevlake, metode nanoindentacije odnosno ispitivanjem tvrdoće, utvrđivanjem lomne žilavosti, analizom mikrostrukture osnovnog materijala ustanoviti karakteristike reznog alata tj. reznih pločica. Navedena ispitivanja provedena su na dvije rezne pločice koje su proizvedene od sinteriranog tvrdog metala koji je naknadno prevučem postupkom prevlačenja. Rezultati navedenih ispitivanja u kontekst stavljaju karakteristike reznog alata sa prikupljenim podacima o trajnosti alata.

## 2. Obrada odvajanjem čestica

Obrada materijala odvajanjem čestica predstavlja dio obradnih, tehnoloških i proizvodnih sustava, koji se ograničava na fizički proces odvajanja materijala [2].

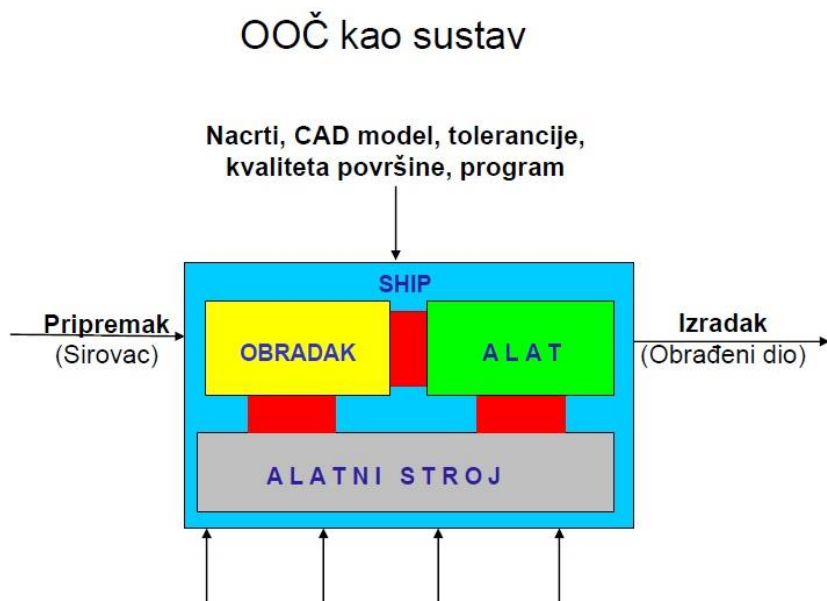
Cilj je kroz obradni sustav izvršiti određene operacije obrade pomoću kojih sirovac pretvaramo u gotov proizvod. Danas veći dio raznih elemenata strojeva i konstrukcija, svoj konačni oblik, dimenzije i kvalitetu površine dobiva upravo zahvaljujući obradi odvajanjem čestica.

Nakon procesa obrade, uz gotov proizvod dobivamo i otpadni materijal, odvojenu česticu – strugotinu, koja se kasnije može oporabiti. Međutim, oblik odvojene čestice uvelike ovisi o materijalu obratka, parametrima postupka (posmak, dubina rezanja, brzina rezanja) kao i o geometriji rezne oštrice i geometriji lomača. Kontinuirana odvojena čestica može uzrokovati namotavanje oko alata i obratka te u konačnici površinski oštetiti obradak ili napraviti zastoj u proizvodnji.

U svakoj modernoj proizvodnji, teži se smanjenju troškova proizvodnje i, dakako, povećanju produktivnosti i profitabilnosti samog procesa. Potrebno je poznavati i pridržavati se osnovnih principa obrade odvajanjem čestica, a to su:

1. projektiranje alatnih strojeva i alata koji će odgovarati proizvodnom optimumu,
2. postizanje odgovarajuće kvalitete proizvoda, uz sve strože zahtjeve, u vidu točnosti izrade i kvalitete obrađenih površina,
3. projektirati proizvodne procese, na način da obradni sustav zadovoljava sve uvjete ekonomičnosti proizvodnje [2].

Obradni sustav, generalno možemo opisati prikazom na slici 1.



**Slika 1. Obrada odvajanjem čestica (OOČ) kao obradni sustav [3]**

Prema slici 1. proces obrade kreće prijenosom tehničke dokumentacije u određeni programski paket. Tehnolog zatim u virtualnoj okolini simulira proces proizvodnje. Nadalje, proces se u obliku koda prenosi na alatni stroj. Alatni stroj i alat se od strane tehničara uštima za rad. Nakon provjere rada alatnog stroja na ulaz u stroj dopremamo pripremak (sirovac) te nakon obrade iz stroja dobivamo obređeni dio (izradak). U procesu se ovisno o postupku može koristiti i sredstvo hlađenja, ispiranja i podmazivanja u obliku emulzije (mineralnog ulja i vode).

Uz poznavanje mehaničkih svojstava materijala sirovca koji obrađujemo najveći naglasak stavljen je na alatni stroj te alat, koji je glavna tema ovog rada.

Alatni stroj omogućuje odvijanje proizvodnog procesa pomoću alata, te mora osigurati:

1. sigurno međusobno kretanje alata i obratka,
2. omogućiti stalan međusobni odnos alata i obratka (numerički upravljano),
3. konstrukcijski proračunat za sve sile rezanja, kako ne bi došlo do katastrofalnog kvara.

Obrada odvajanjem čestica – tokarenje, najzastupljenija je obrada u velikoserijskoj proizvodnji kućišta kotrljajućih ležajeva. Tokarenje je postupak obrade odvajanjem čestica (rezanjem) pretežno rotacijskih (simetričnih i nesimetričnih, okruglih i ne okruglih) površina. Izvodi se na različitim vrstama tokarilica, poput primjera na slici 2.



**Slika 2. Tokarski stroj marke Spinner**

Takve su tokarilice u modernoj proizvodnji upravljane numerički, odnosno upravljačkim sklopovima koji su pogonjeni računalnim kodom. Nazivaju se računalno (numerički) upravljane tokarilice ili CNC (engl. *Computer Numerical Control*) tokarilice.

Kod tokarenja razmatramo kartezijev koordinatni sustav u koji pozicioniramo rezni alat te sam obradak uz dvije vrste gibanja. Glavno gibanje (rotacija) pridruženo je obratku, koji se nakon stezanja u steznoj glavi, pogoni pripadajućim pogonom alatnog stroja.

Posmično gibanje pridruženo je alatu, u osnovi je pravolinijsko kontinuirano, u pravcu paralelnom osi rotacije obradka (os "z") ili u pravcu okomitom na os rotacije (os "x").

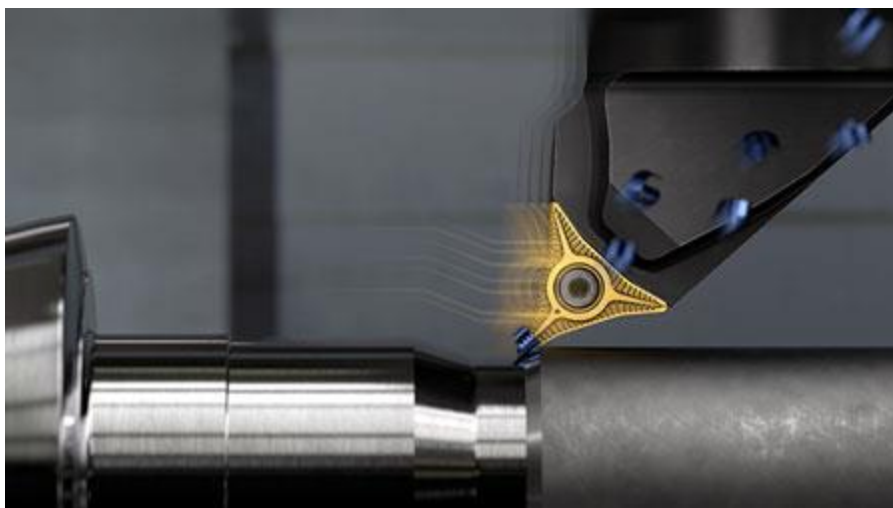
Kada su u određenom omjeru uključena posmična gibanja u obje osi, nastaje posmično gibanje krivuljnog oblika koje je potrebno za izradu različitih kosina, utora i skošenja na samom obratku.

Tokarenje se može podijeliti na osnovi više kriterija podjele:

- prema proizvedenoj kvaliteti obrađene površine: grubo, završno i fino tokarenje,
- prema kinematici postupka: uzdužno i poprečno,
- prema položaju obrađene površine: vanjsko i unutarnje,
- prema obliku obrađene (elementarne) površine: okruglo, plansko (poprečno), konusno, profilno, oblikovno (kopirno), tokarenje navoja i neokruglo.

Alati predstavljaju sredstva pomoću kojih se vrši obrada. Alat za tokarenje je tokarski nož definirane geometrije reznog dijela s jednom glavnim reznom oštricom. Pretežito se koriste alati sa izmjenjivim reznim oštricama, prikazani na slici 3.

Za rezni dio alata najčešće se koriste brzorezni čelici, tvrdi metali, kermet, keramika, kubni nitrid bora te polikristalni dijamant. Analizom proizvodnog procesa te pravilnim izborom alatnog materijala moguće je postići značajne uštede i sniženje proizvodnih troškova [2].

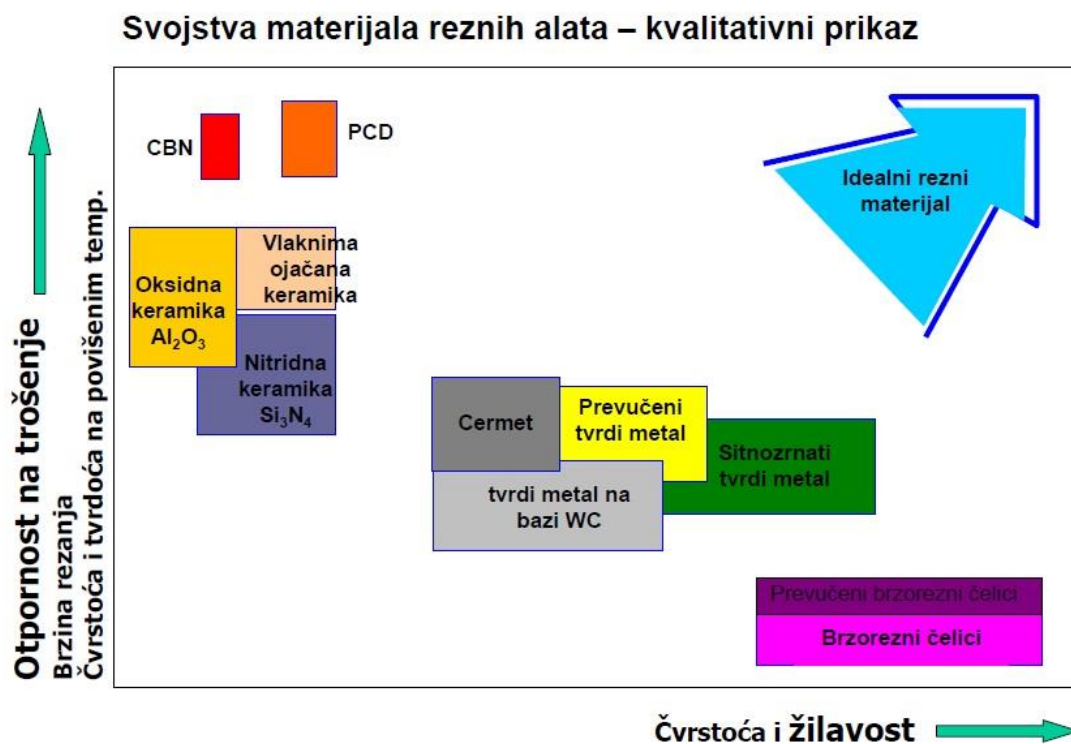


**Slika 3. Izmjenjive rezne pločice [3]**

### 3. Materijali reznog alata

Glavni čimbenici u konačnoj cijeni postupka obrade odvajanjem čestica jesu, cijena nabave i održavanja alatnog stroja, cijena nabave sirovca, potrošnja električne energije tokom rada, količina i cijena sredstva za hlađenje ispiranje i podmazivanje koje stroj troši, odvojena čestica koja može uzrokovati zastoj proizvodnje i potrošnja reznog alata preko kojega se vrši obrada.

Materijal, kvaliteta te cijena reznog alata, uvelike ovisi o materijalu obratka te potrebnoj postignutoj kvaliteti istoga. Na slici 4. grafički su prikazani prednosti i nedostaci pojedine vrste materijala.



Slika 4. Svojstva reznih materijala [4]

Na prikazu je vidljiva obrnuta korelacija dva najbitnija svojstva reznih alata, a to su tvrdoća i žilavost.

Žilavost predstavlja mjeru otpornosti materijala na pojavu krhkog loma, dok tvrdoća predstavlja mjeru otpornosti na prodiranje drugog, znatno tvrdog materijala. Povećanje žilavost podrazumijeva smanjenje tvrdoće i obrnuto te na određeni način stavlja idealan rezni alat u sferu nedostižnosti.



### 3.1. Tvrdi metali – (eng. *Cemented Carbides*)

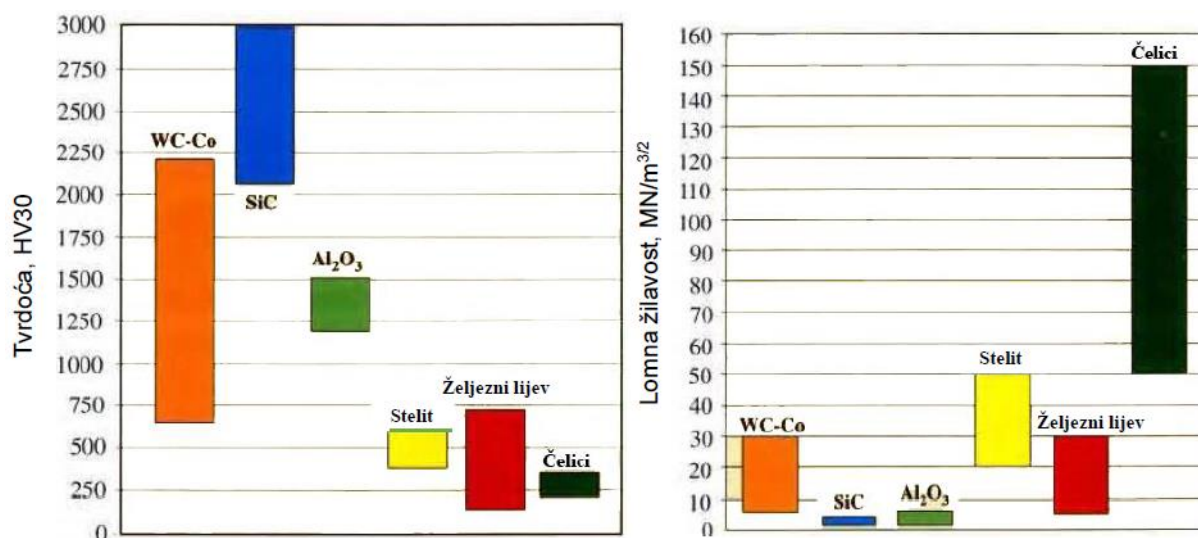
Tvrđi metali na bazi volfram-karbida (WC), predstavljaju izvrstan kompromis tvrdoće i žilavosti. Spadaju u grupu neoksidne keramike, odnosno kompozita sa metalnom matricom. Mikrostrukturno, tvrdi metali sastoje se od velikog udjela karbida volframa, titana i tantala, koji su povezani kobaltovom (Co) matricom. Karbidi imaju funkciju nositelje tvrdoće i otpornosti na trošenje, dok kobalt kao vezivo osigurava povezanost karbida i duktilnost.

Tvrđim metalima izražena su poželjna svojstva poput: visoke tvrdoće i otpornosti na trošenje, visokog modula elastičnosti, visoke vlačna čvrstoća i čvrstoća na povišenim temperaturama, dobre postojanost na temperaturne promjene, otpornost na koroziju.

Na slici 5. prikazana je mikrostruktura WC/Co tvrdog metala. Svijetli poligoni predstavljaju karbide volframa, dok tamna mjesta predstavljaju vezivo, odnosno kobalt [5].



Slika 5. Mikrostruktura tvrdog metala WC/Co [5]



Slika 6. Usporedba tvrdoće i lomne žilavosti tvrdih metala i ostalih materijala [6]

Svojstva tvrdog metala proizlaze iz njegovih komponenti, tvrdog i krhkog volfram-karbida vezanog u mekšoj i duktilnoj kobaltovoj matrici. Udio kobalta može varirati u rasponu od 3 do 30%. Glavni razlog korištenja kobaltova matrica leži u njenoj odličnoj mogućnosti oblikovanja procesima mljevenja i miješanja te većoj topivosti volfram-karbida na temperaturama sinteriranja. Negativna strana kobalta kao strateškog materijala, je njegova visoka cijena odnosno, alati od sinteriranog tvrdog metala skuplji su od konvencionalnih čelika, dobiveni konvencionalnim tehnologijama proizvodnje [6].

### 3.2. PVD postupak prevlačenja

Fizikalno prevlačenje iz parne faze, odnosno PVD postupak (*eng. Physical Vapour Deposition*), jedan je od postupaka nanošenja funkcionalnih prevlaka na osnovni materijal. Stvaranje slojeva prevlaka ostvaruje se deponiranjem čestica, tj. atoma, molekula i iona u vakuumu, na površinu osnovnog materijala. Te čestice nastaju fizikalnim putem odnosno prelaskom iz čvrste u parnu fazu. PVD postupkom mogu se postići tanke prevlake različitih spojeva, debljine od 2 do 5  $\mu\text{m}$  za jednoslojne, odnosno do 15  $\mu\text{m}$  za višeslojne prevlake. Temperatura postupka je niža u odnosu na ostale postupke prevlačenja (do 500 °C) tako da prevučeni PVD sloj ne zahtijeva naknadnu toplinsku obradu [7].

U početku procesa, pojedinačne čestice se iz izvora (*eng. Target*) prevode iz čvrstog u plinovito stanje isparavanjem izvora snopom elektrona, električnim lukom ili katodnim otprašivanjem. Nadalje, čestice se dopremaju do osnovnog materijala pri čemu se na izvoru uparene čestice uz dovoljno niski tlak kreću pravocrtnom linijom od izvora do osnovnog materijala, u vakuumu. Nedostatak PVD postupka je mogućnost prevlačenja samo onih ploha koje su vidljive od izvora, tj. između površine i izvora čestica ne smije biti nikakvih prepreka, (*eng. Line of Sight*).

Zato se obratci postavljaju na rotirajuće nosače, kako bi taloženje čestica po cijeloj površini uzorka bilo ujednačeno. Zadnji dio PVD postupka je deponiranje čestica na osnovni materijal odnosno prijelaz iz plinovitog u čvrsto stanje [7].

U slučaju prevlačenja tvrdih metala, prevlake tvrdih spojeva povećavaju otpornost na abrazijsko trošenje, smanjuju pojavu adhezijskog trošenja i naljepljivanje materijala obratka (*eng. Build up Edge*). PVD i CVD postupkom povećava se trajnost prevučenog dijela te je zbog povećane otpornosti na trošenje alata, moguće pristupiti povećanju brzine obrade te povećanju proizvodnosti cijelog procesa.

### 3.3. CVD postupak prevlačenja

Kemijsko prevlačenje iz parne faze, odnosno CVD postupak (*eng. Chemical Vapour Deposition*), jedan je od postupaka nanošenja funkcionalnih prevlaka na osnovni materijal. Stvaranje slojeva prevlaka ostvaruje se taloženjem čestica na površinu materijala, koje nastaju u kemijskim reakcijama pri temperaturama do 1000 °C.

U početku procesa iz komore se evakuira atmosfera te se u reducirajućoj zaštitnoj atmosferi komora zagrijava na 900-1000 °C, kako bi se depasivirala površina na koju se nanosi prevlaka. Ugrijavanje se vrši u reaktoru sa hladnim ili toplim stjenkama, odnosno moguće je zagrijavanje cijele komore ili izravno obratka [7].

Kada se dostigne temperatura obrade, u komoru se pušta struja reaktivnih plinova te sredstvo za taloženje. Nakon provedenih kemijskih reakcija, na površinu obrađivanog materijala talože se slojevi funkcionalne prevlake, dok se reakcijski plinovi i nusprodukti pumpom isisavaju iz komore te neutraliziraju u posebnom spremniku. Slojevi koji nastaju debljine su od 2 do 10 µm. Zbog visoke temperature procesa u odnosu na PVD postupak, dolazi do povećane međudifuzije između osnovnog materijala i sloja, što rezultira boljom prionjivosti slojeva [7].



**Slika 7.    Prevučene rezne pločice WC/Co [8]**

#### **4. Analiza kvalitete reznog alata**

Koncept ovog završnog rada temelji se na ispitivanju kvalitete reznog alata odabranim metodama te dovođenjem u kontekst dobivenih rezultata s prikupljenim podacima o trajnosti alata. U ovom radu ispitivanja su provedena na dvije rezne pločice različitih geometrija i proizvođača za koje su poznati podaci o trajnosti, zabilježeni u proizvodnji. Provedena su sljedeća ispitivanja:

- utvrđivanja debljine prevlake kalotestom,
- utvrđivanje adhezivnosti prevlake Rockwell C metodom,
- analiza mikrostrukture osnovnog materijala i prevlake,
- mjerenje tvrdoće metodom nanoindentacije,
- utvrđivanje lomne žilavosti Palmqvist metodom.

U nastavku su opisani postupci i uređaji koji prema standardima i normama omogućuju empirijski pristup navedenom konceptu. Pretpostavka je kako će odabrane metode uz prikupljene podatke o eksploataciji reznog alata dati uvid u trošenje istog. Kao takav, ovaj rad može poslužiti kao temelj za opsežnu analizu potrošnje alata, koji će zasigurno biti koristan u industrijskoj primjeni.

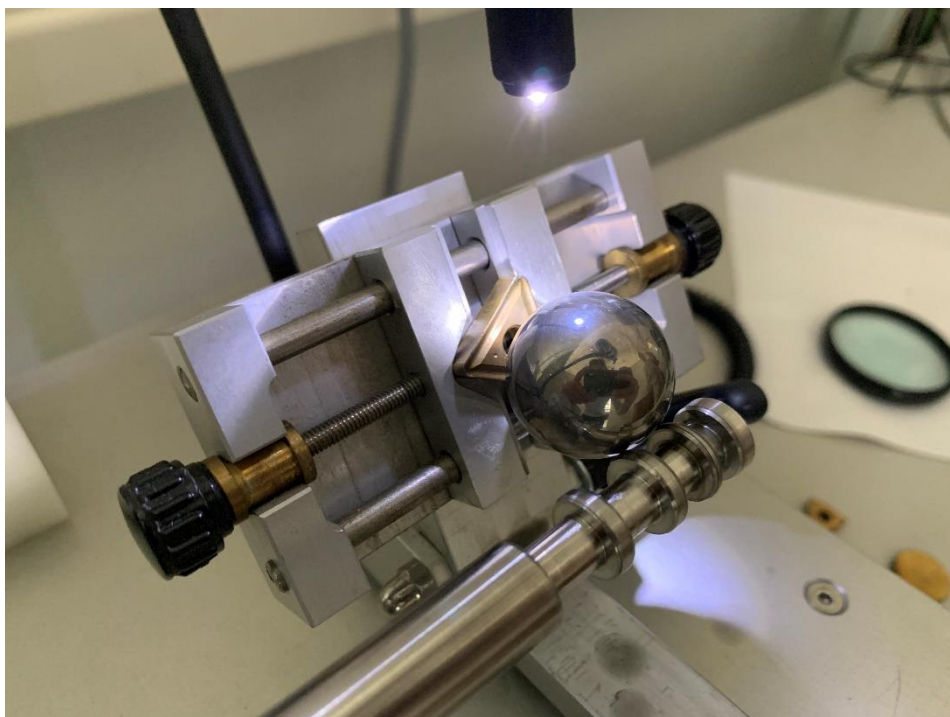
#### 4.1. Mjerenje debljine prevlake kalotestom

Prevučeni tvrdi metali, kao najzastupljeniji rezni alati na tržištu se u vidu ulazne kontrole mogu periodično podvrgnuti utvrđivanju debljine prevlake postupkom koji se naziva kalotest.

Kalotest se temelji na abrazijskom trošenju materijala prevlake uzorka. Postiže se kontaktom i rotacijom čelične kuglice (određenog promjera i mase) i uzorka na koji je kuglica oslonjena s jedne strane. S druge strane kuglica je oslonjena na vratilo koje je pogonjeno elektromotorom. Masa kuglice izaziva normalnu silu na dodiru kuglice i uzorka te rotacijom pri željenom broju okretaja u kontaktu sa površinom uzorka, kuglica troši prevlaku. U procesu se koristi dijamantna emulzija koja kao nosioc tvrdih čestica, preko čelične kuglice troši površinu. Emulzija sadrži fine dijamantne čestice promjera 1  $\mu\text{m}$ . Uređaj za provedbu ovakve metode naziva se kalotester. Na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na Zavodu za materijale na Katedri za toplinsku obradu i inženjerstvo površina nalazi se kalotester, prikazan na slici 8. proizveden od tvrtke TRIBOtechnic iz Francuske. [9]

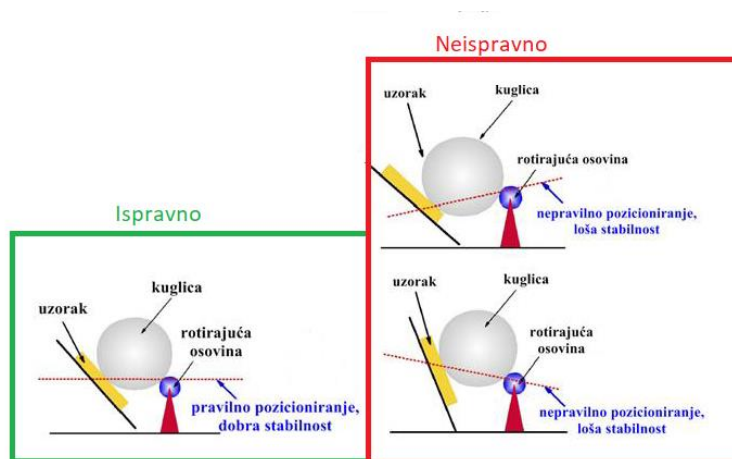


Slika 8. Kalotester TRIBOtechnic



Slika 9. Sučelje kuglica/uzorak

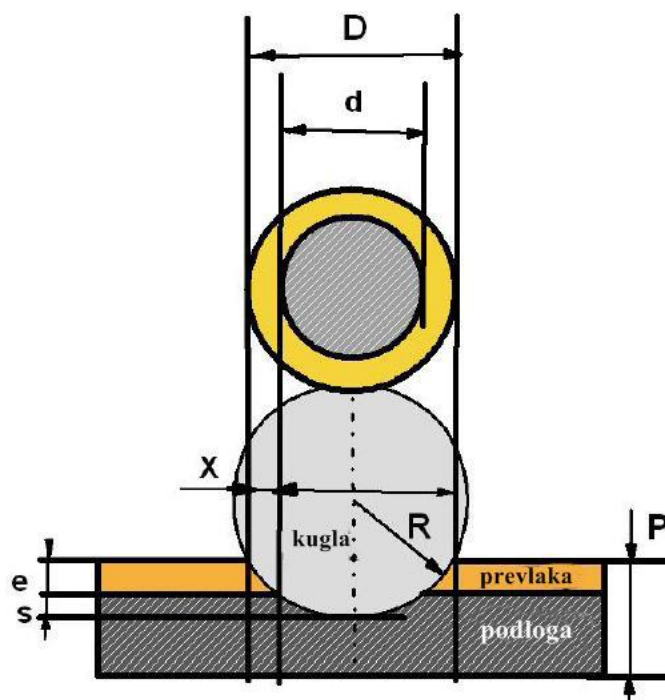
Na slici 9 prikazano je sučelje uzorka, kuglice te pogonskog vratila. Kod nepravilnog pozicioniranja, dolazi do klizanja kuglice odnosno do nepotpunog prijenosa momenta s vratila na kuglicu. Zato je potrebno obratiti pažnju na pozicioniranje sustava prilikom pokretanja testiranja, kako je prikazano na slici 10. [9].



Slika 10. Prikaz pravilnog pozicioniranja sustava prilikom testiranja kalotesterom [9]



Nakon analize istrošene kalote na uzorku pripadajućim svjetlosnim mikroskopom te ustanovljenja uspješnosti provedenog ispitivanja, provodi se izračun debljine prevlake prema slici 11.



Slika 11. Izračun debljine prevlake [9]

U ovom ispitivanju korištena je kuglica promjera 30 mm tj. ( $R=15\text{mm}$ ), dok se parametri  $d$  i  $D$ , očitavaju na ekranu svjetlosnog mikroskopa koji u svojem programskom paketu omogućuje jednostavan izračun duljina. Navedeni podaci se unose u formulu:

$$e_d = \frac{D^2 - d^2}{8R} \quad (1)$$

$e_d$  - debljina prevlake,

$D$  - promjer vanjskog prstena,

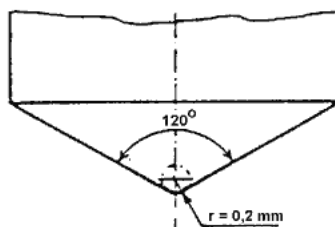
$d$  - promjer unutarnjeg prstena,

$R$  - polumjer kuglice [9].



#### 4.2. Ispitivanje adhezivnosti prevlake prema normi VDI 3198

Za ispitivanje adhezivnosti prevlake na osnovnom materijalu provedeno je ispitivanje provedeno prema normi VDI 3198 koje se temelji na utiskivanju Rockwell C indentora na prevučenoj površini, prikazanog na slici 12.



Slika 12. Rockwell C indenter [8]

Rockwell C indenter osim što se koristi za mjerenje tvrdoće prema Rockwellu (HRC), koristi se za procjenu adhezivnosti prevlake na osnovnom materijalu. Indenter je izrađen od dijamanta s vršnim kutom od  $120^\circ$ , a njegovim utiskivanjem na površini ispitivanog materijala dolazi do plastične deformacije i prijeloma prevučenih slojeva. [10]

Uređaj za mjerenje tvrdoće po Rockwellu koji se nalazi u Laboratoriju za toplinsku obradu na Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu prikazan je na slici 13.

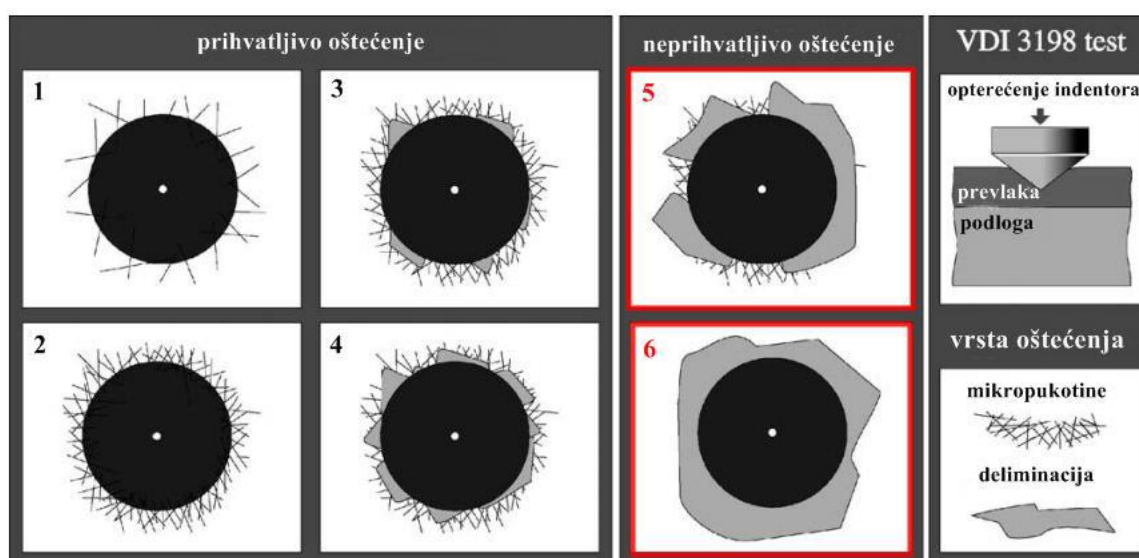


Slika 13. Uređaj za mjerenje tvrdoće po Rockwellu

Nakon utiskivanja indentora otisak se promatra pod svjetlosnim mikroskopom te se analizira ponašanje prevlake u području otiska indentora.

Prionjivost prevlake podijeljena je u šest razreda, prema normi VDI 3198, prikazano na slici 14, s obzirom na oštećenje rubnog područja otiska:

- HF1 - mali broj pukotina,
- HF2 - veći broj pukotina, bez delaminacije (ljuštenja),
- HF3 - pukotine uz slabu delaminaciju,
- HF4 - pukotine uz djelomičnu delaminaciju,
- HF5 - pukotine uz prevladavajuću delaminaciju,
- HF6 - potpuna delaminacija prevlake [10].



**Slika 14. Prikaz postupka i šest kategorija oštećenja prevlake [10]**

Na slici 14. vidljivo je kako razredi HF1 i HF2 ukazuju na izvrsnu prionjivost prevlake. Razredi HF3 i HF4 ukazuju na prihvatljivu prionjivost prevlake, odnosno tolerira se mala količina delaminacije. U slučaju razreda HF5 i HF6 prionjivost prevlake nije prihvatljiva, jer oko otiska prevladava prevelika količina delaminacija prevlake.

### 4.3. Metalografska analiza

Metalografija je interdisciplinarna znanstvena grana koja se bavi proučavanjem makrostrukture i mikrostrukture materijala. Makrostruktura je vidljiva golim okom dok se za analizu mikrostrukture koristimo svjetlosnim i elektronskim mikroskopom. Uzorak je pripremljen za analizu pod svjetlosnim mikroskopom. Od ispitivanih reznih pločica, izrezan je reprezentativni uzorak, koji je dimenzijama pogodan za ulijevanje u polimernu masu. Uzorak je izrezan pomoću dijamantne rezne ploče koja je znatno tvrđa od konvencionalnih reznih ploča. Ulijevanje u polimernu masu izvedeno je zbog mogućnosti automatskog brušenja i poliranja, kao i lakšeg rukovanja. Nakon brušenja i poliranja uzorak je nagrižen u Murakamijevoj otopini (10g  $K_3[Fe(CN)_6]$  i 10g KOH u 100ml  $H_2O$ ) kako bi pojedine faze bile vidljive pod mikroskopom.



Slika 15. Prikaz metalografskih uzoraka nakon rezanja



**Slika 16. Zalijevanje uzoraka u polimernu masu**

Kod poluautomatske pripreme važno je da su metalografski uzorci jednake veličine što se postiže hladnim ulijevanjem u kalupe sa akrilnim ili epoksi smolama. Pored hladnog ulijevanja uzorka također se primjenjuje toplo ulijevanje pri povišenoj temperaturi i tlakom u prešama. Mikroskopska analiza obavljena je na mikroskopu marke Olympus GX51 prikazanom na slici 17. koji se nalazi u Laboratoriju za metalografiju na Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.



**Slika 17. Mikroskop OLYMPUS GX51**

#### 4.4. Mjerenje tvrdoće osnovnog materijala i prevlake

Tvrdoća je svojstvo materijala, a definira se kao otpornost materijala prodiranju drugoga, znatno tvrdjeg tijela. Tvrdoća kao mjerna veličina nema osnovnu jedinicu u SI sustavu i kao takva pripada mjernim veličinama koje se određuju na temelju skale referentnih vrijednosti. Tvrdoća nema kvantitativnu vrijednost, odnosno opisana je preko opterećenja primijenjenog na uzorak, određenom vrstom indentora u određenom vremenskom razdoblju [5].

U radu su ispitani prevučeni tvrdi metali kojima se radi potpune karakterizacije ispituje nanotvrdoća. Zbog malih primijenjenih sila moguće je određivanje tvrdoće tankih prevlaka, koje su višestruko tanje od osnovnog materijala.

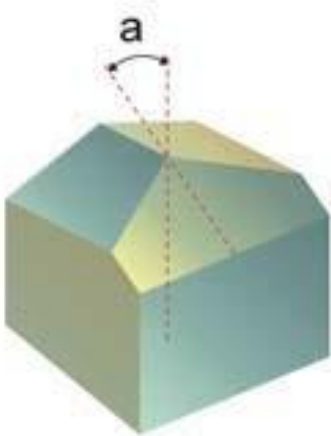
Tvrdoća prevlake ispitana je instrumentiranom metodom utiskivanja na dinamičkom ultramikro tvrdomjeru DUH-211 (Shimatzu) prema ISO 14577-1 normi.



Slika 18. Tvrdomjer DUH-211 proizvođača Shimatzu, Japan

Princip rada ovog tvrdomjera ostvaruje se utiskivanjem indentora određenom silom, a dobiveni rezultati dubine i tvrdoće temelje se na primijenjenom opterećenju.

Za indenter je primijenjen Berkovich indenter, odnosno indenter oblika trostrane prizme s vrhom kuta od  $115^\circ$  koji se preporučuje za ispitivanje nanotvrdoće [11].



**Slika 19. Slika Berkovichevog indentora**

Berkovich indenter predstavlja indenter u obliku trostrane piramide koja se koristi u metodama nanoindentacije. Ovaj tip indentora je izrazito pogodan za nanoindentacijska mjerenja iz razloga što tri stranice piramide omogućuju veću oštrinu vrha nego u slučaju četverostrane Vickersove piramide.

Prilikom ispitivanja tvrdoće i ostvarivanja karakteristične krivulje korištena je opcija opterećivanje – rasterećivanje pri čemu se kontinuirano prati sila do zadane vrijednosti koja ovisi o materijalu koji se ispituje te dubina utiskivanja paralelno sa silom. Postupak ispitivanja počinje unosom parametara postupka, koji se postavljaju prilikom svakog novog ispitivanja. Budući da se u ovom ispitivanju koristi sila od 200 mN potrebna je adekvatna priprema površine uzorka, odnosno površina mora biti ispolirana do visokog sjaja, te očišćena od nečistoća [11].



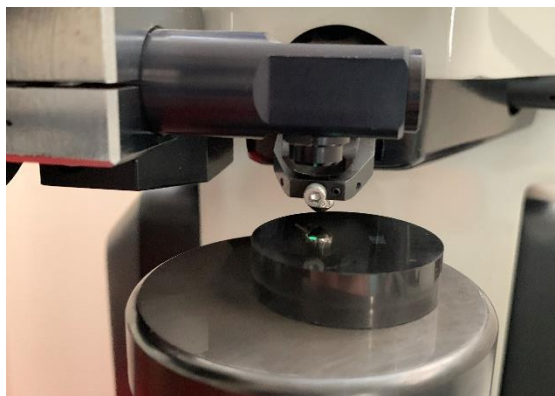
#### 4.5. Mjerenje lomne žilavosti – Palmqvist metoda

Palmqvistova metoda često se primjenjuje za utvrđivanje vrijednosti lomne žilavosti tvrdih metala. Prednost Palmqvistove metode je jednostavno mjerenje, bez razaranja, pri čemu nije potrebna specijalna geometrija ispitivanog dijela, poput izrada specifičnih epruveta za konvencionalno ispitivanje lomne žilavosti. Ispitivanje je odrađeno na Indentec-ovom tvrdomjeru koji se nalazi u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Zavodu za materijale, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, prikazanog na slici 20.



**Slika 20. Tvrdomjer Indentec**

U slučaju Palmqvist metode tvrdomjer se podešava na silu indentacije od 294N, što odgovara tvrdoći HV30. Nakon indentiranja uzorak se analizira pod svjetlosnim mikroskopom.



**Slika 21. Postupak mjerenja tvrdoće**

Lomna žilavost predstavlja kritičan iznos vrijednosti faktora intenzivnosti naprezanja, kod kojeg u ravninskom stanju deformacije dolazi do nestabilnog širenja do tada mirujuće pukotine. Lomna žilavost koristi se u proračunima konstrukcijskih elementa. Za izračun lomne žilavosti, Palmqvistova metoda oslanja se na vrijednost tvrdoće i opterećenja primijenjenog na indenter te izmjerene vrijednosti duljina pukotina, vidljivo na slici 22. [12].

Lomna žilavost prema Palmqvistu izračunava se sljedećom jednadžbom:

$$W_K = A \cdot \sqrt{HV} \cdot \sqrt{W_G} \quad (1)$$

gdje je:

$W_K$  [MPa $\sqrt{m}$ ] – lomna žilavost

$A$  – konstanta iznosa 0,0028

$HV$  – tvrdoća po Vickersu

$W_G$  [N/mm] – omjer opterećenja i ukupne duljine pukotina

Tvrdoća  $HV$  izračunata je iz jednadžbe:

$$HV = 1,8544 \cdot \frac{F}{d_{sr}^2}, \text{ N/mm}^2 \quad (2)$$

gdje je:

$F$  – sila utiskivanja (294,20 N),

$d_{sr}$  – srednja vrijednost dijagonala otiska [mm].



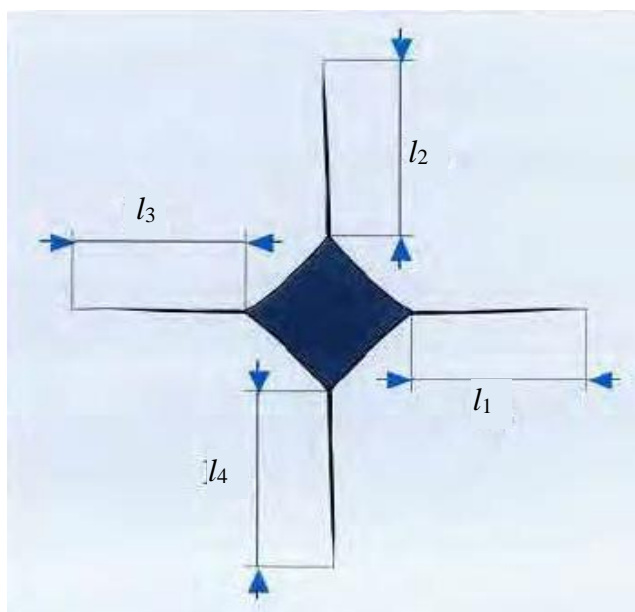
Omjer opterećenja i ukupne duljine pukotina slijedi iz izraza:

$$W_G = \frac{F}{T}, N/mm \quad (3)$$

gdje je:

F – sila utiskivanja (294,20 N),

T- ukupna duljina pukotina ( $T = l_1 + l_2 + l_3 + l_4$ ) [mm], prikazano na slici 22.



Slika 22. Pukotine koje propagiraju iz vrhova otiska [12]

## 5. Eksperimentalni dio

U eksperimentalnom dijelu rada provedena su sljedeća ispitivanja, koja su pojašnjena u teorijskom dijelu rada:

- utvrđivanja debljine prevlake kalotestom,
- utvrđivanje adhezivnosti prevlake Rockwell C metodom,
- analiza mikrostrukture osnovnog materijala i prevlake,
- metode nanoindentacije odnosno mjerenje tvrdoće,
- utvrđivanje lomne žilavosti Palmqvist metodom.

Ispitivanja su provedena na uzorcima na slici 23. Uzorci su dvije rezne pločice, izrađene od tvrdog metala, te prevučene prevlakom titan-nitrida i titan-karbonitrida.

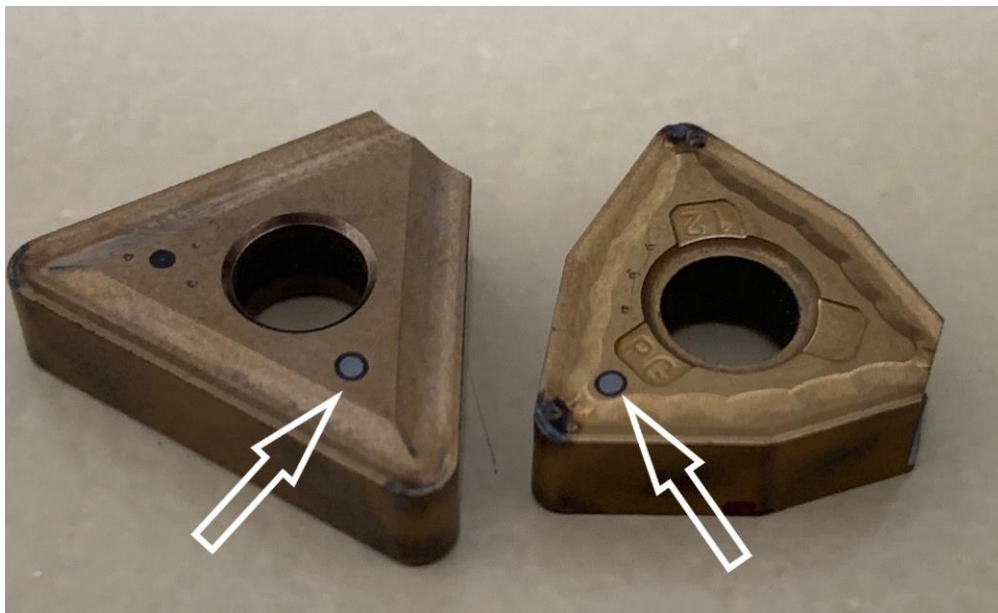
Navedene rezne pločice korištene su u proizvodnji te su za svaku pločicu zabilježeni podaci o trajnosti.



**Slika 23. Uzorci za ispitivanje, uzorak 1 – desno, uzorak 2 - lijevo**

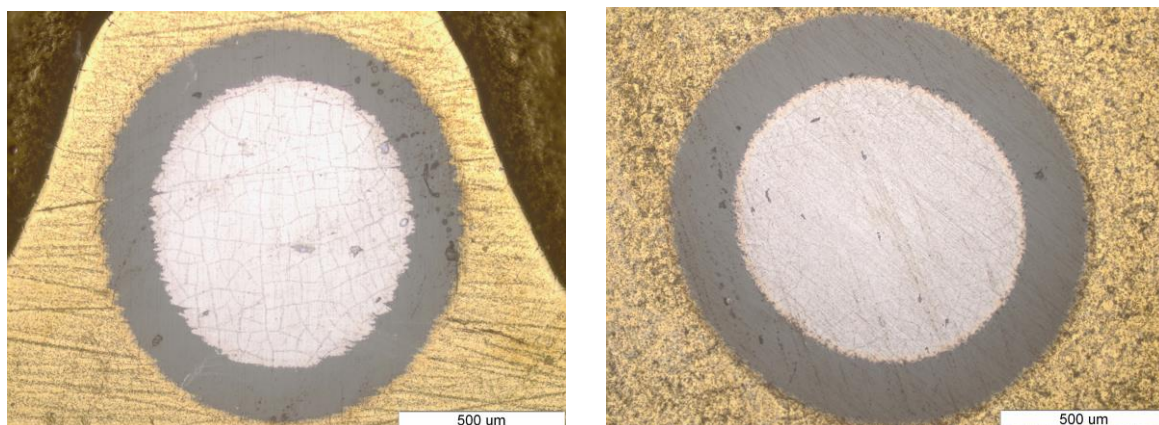
### 5.1. Mjerenje debljine prevlake kalotestom

Nakon provedenog kalotesta, povećalom je provjeren oblik traga kalote te su uzorci analizirani pod svjetlosnim mikroskopom.

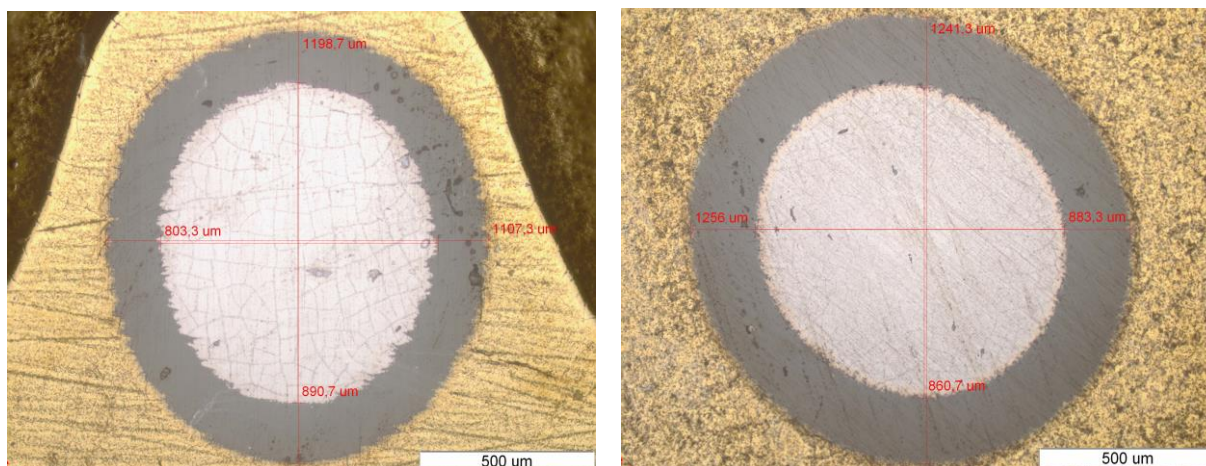


**Slika 24. Uzorci 1 i 2, otisak kalote označen strelicama**

Uzorci su pregledani pod svjetlosnim mikroskopom pod povećanjem od 100 puta.



**Slika 25. Uzorci 1 i 2 pod svjetlosnim mikroskopom, povećanje 100x**



**Slika 26. Uzorci 1 i 2, mjerenje karakterističnih veličina**

U slučaju idealno provedenog kalotesta dovoljno je izmjeriti promjer manjeg i većeg otiska kalote. Budući da otisak nije idealna kružnica već je oblika elipse, izmjereni su promjeri svake osi elipse te je izračunata srednja vrijednost. Proračun se vrši preko formule spomenute u teorijskom dijelu.

**Tablica 1. Rezultati kalotesta**

	d1, $\mu\text{m}$	d2, $\mu\text{m}$	D1, $\mu\text{m}$	D2, $\mu\text{m}$	e1, $\mu\text{m}$	e2, $\mu\text{m}$	esr, $\mu\text{m}$
Uzorak 1	890,7	803,3	1198,7	1107,3	5,3	4,8	5,1
Uzorak 2	883,3	860,7	1256	1241,3	6,6	6,7	6,7

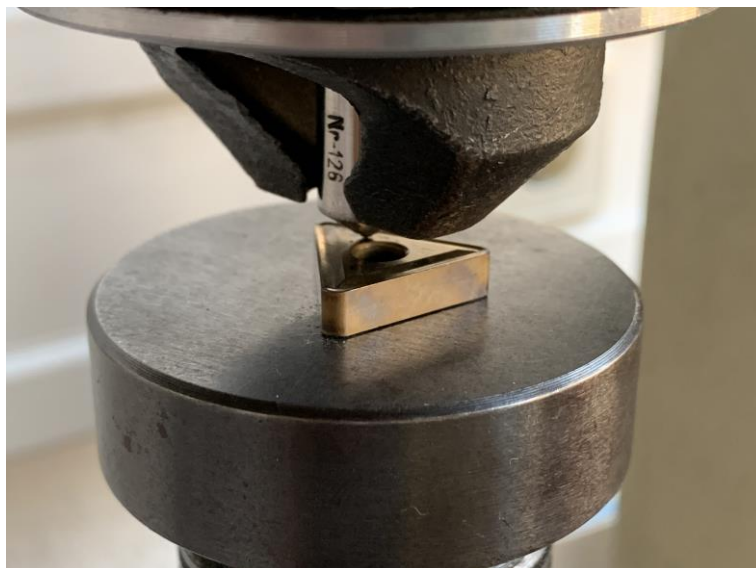
Kalotestom je izmjerena debljina prevlake uzorka 1 u iznosu 5,1  $\mu\text{m}$  te uzorka 2 u iznosu 6,7  $\mu\text{m}$ . Vrijednosti odstupaju od vrijednosti dobivenih metalografskim ispitivanjem poprečnog presjeka odnosno ovi rezultati odgovaraju približno debljinama površinskog sloja. Zbog kompleksnosti površinske geometrije kalotestom nije potrošen i drugi sloj prevlake. Za pretpostaviti je kako su rezne pločice prevučene s dva sloja te je ta tvrdnja kasnije potkrepljena metalografskom analizom poprečnog presjeka.

Na slici 25. i 26. uočeno je ograničenje primjene kalotestera u primjeni ispitivanja prevlaka na kompleksnoj geometriji reznog alata. Slobodna površina potrebna za kalotest nije dostatna kako bi se potrošila oba sloja prevlake.



## 5.2. Ispitivanje adhezivnosti prevlake prema normi VDI 3198

Na ispitnim uzorcima proveden je postupak utiskivanja Rockwell C indentora, prikazan na slici 27. Na svakoj pločici postupak je ponovljen 3 puta te je za analizu izabran najreprezentativniji otisak.



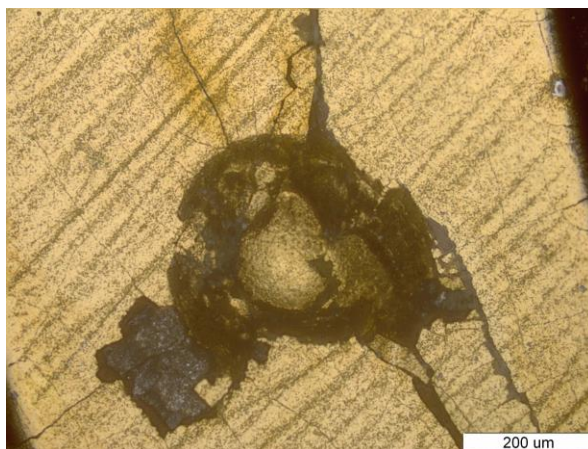
Slika 27. Slika postupka utiskivanja Rockwell C metodom

Slika 28. predstavlja položaj na ispitnom uzorku, gdje je provedeno ispitivanje. Bijelim linijama označena su područja gdje su provedena utiskivanja indentora.

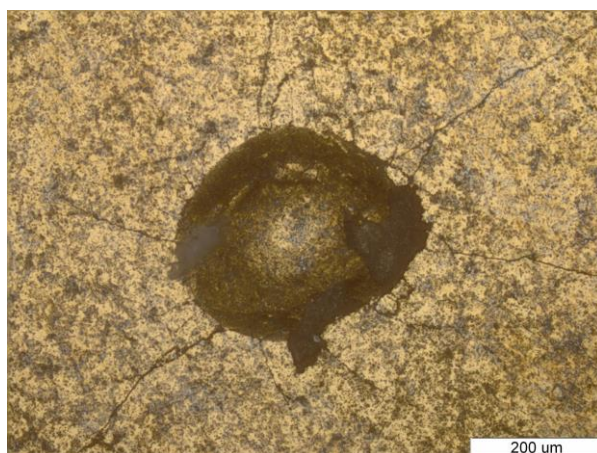


Slika 28. Vizualni pregled otiska indentora

Nakon vizualne kontrole, ispitni uzorci analizirani su pod svjetlosnim mikroskopom, gdje su reprezentativni otisci uspoređeni sa tablicom na slici 14.



**Slika 29. Analiza adhezivnosti prevlake uzorka 1**



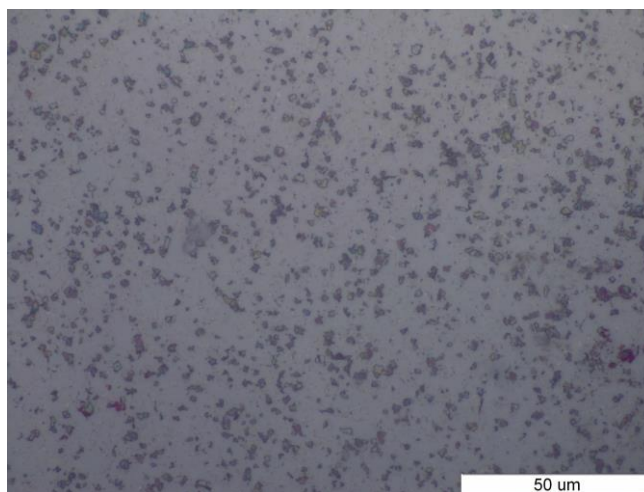
**Slika 30. Analiza adhezivnosti prevlake uzorka 2**

Površina uzoraka 1 i 2 nakon utiskivanja Rockwell C indentorom, promatrane su pod svjetlosnim mikroskopom. Usporedbom slika testa sa tablicom VDI 3198, navedenom u teorijskom dijelu zaključeno je:

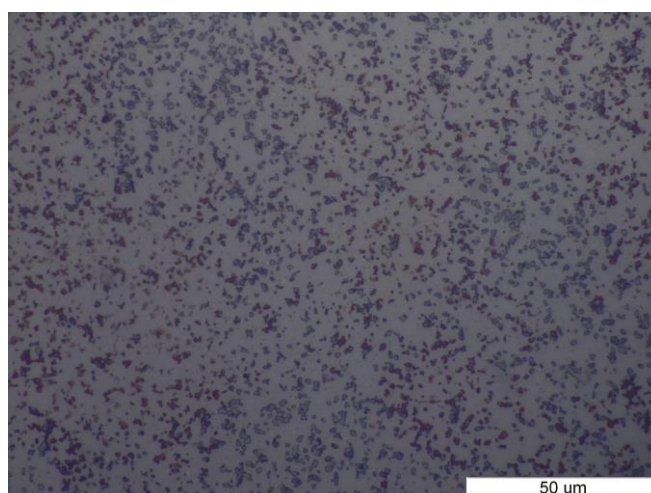
1. prvi uzorak pokazuje oštećenje i delaminaciju sličnu razini HF5, odnosno na površini je primijećeno neprihvatljivo oštećenje,
2. drugi uzorak pokazuje oštećenje slično razini HF1, odnosno na površini je primijećeno iznimno prihvatljivo oštećenje, bez pojave delaminacije.

### 5.3. Metalografska analiza

Uzorci 1 i 2 su poliranjem i nagrivanjem pripremljeni za analizu mikrostrukture pod svjetlosnim mikroskopom. Površina je nagrivena pomoću Murakamijevog reagensa u trajanju od 3 sekunde, te je potom neutralizirana u vodi.



**Slika 31. Nagrižena mikrostruktura WC/Co uzorka 1, povećanje 1000x**

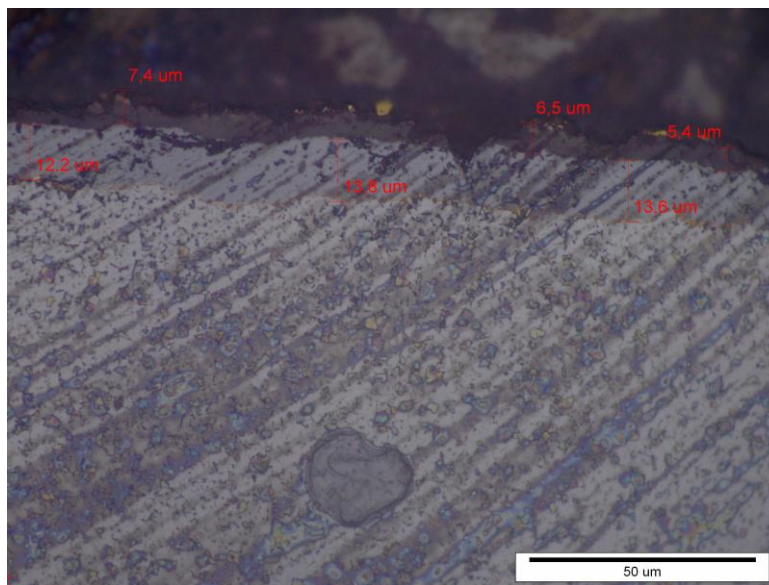


**Slika 32. Nagrižena mikrostruktura WC/Co uzorka 2, povećanje 1000x**

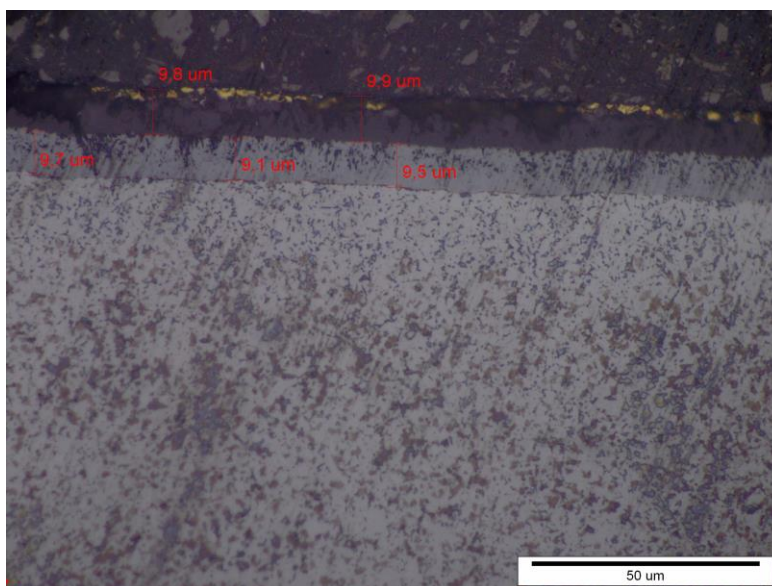
Kobalt se na mikroskopu očituje u vidu tamne faze, dok volfram-karbid predstavlja svijetlu fazu. Kod uzorka 2 vidljiv je povećan udio kobalta te mikrostruktura sitnijeg zrna u odnosu na uzorak 1. Takva mikrostruktura može imati pozitivan utjecaj na povećanje duktilnosti osnovnog materijala, što je u nastavku rada ispitano Palmqvistovom metodom za utvrđivanje lomne žilavosti.



Zbog komplicirane površinske geometrije reznih pločica debljina prevlaka je uz kalotest ispitana i analizom poprečnog presjeka. Pod svjetlosnim mikroskopom, uz povećanje od 1000 puta, analizirane su debljine prevlaka uzoraka 1 i 2.



**Slika 33. Debljine slojeva prevlake uzorka 1**



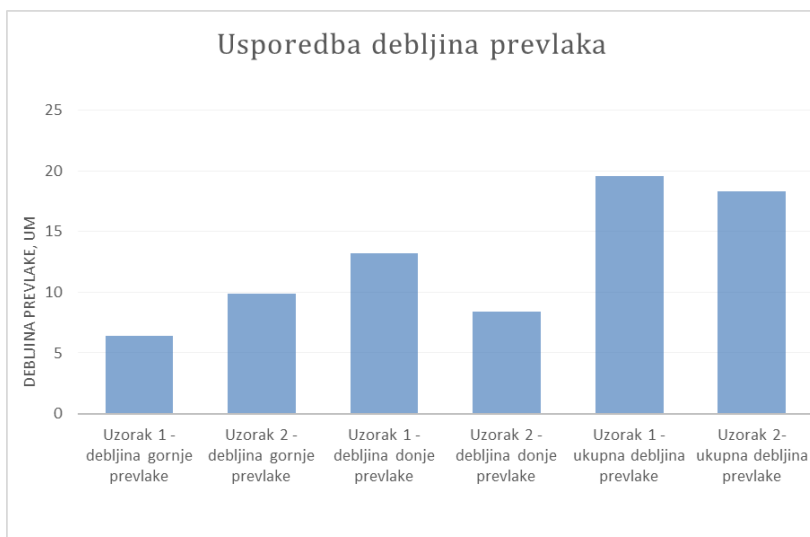
**Slika 34. Debljine slojeva prevlake uzorka 2**



Na slikama 33. i 34. vidljiva su dva sloja prevlake, potporni sloj titan-karbonitrida kao i površinski sloj titan-nitrida. Srednje vrijednosti i odnosi debljina prevlaka prikazane su u tablici 2 te na slici 35.

**Tablica 2. Popis debljina slojeva prevlaka**

Uzorak 1 - debljina gornjeg sloja prevlake	6,4 $\mu\text{m}$
Uzorak 2 - debljina gornjeg sloja prevlake	9,9 $\mu\text{m}$
Uzorak 1 - debljina donjeg sloja prevlake	13,2 $\mu\text{m}$
Uzorak 2 - debljina donjeg sloja prevlake	8,4 $\mu\text{m}$
Uzorak 1 - ukupna debljina prevlake	19,6 $\mu\text{m}$
Uzorak 2 - ukupna debljina prevlake	18,3 $\mu\text{m}$

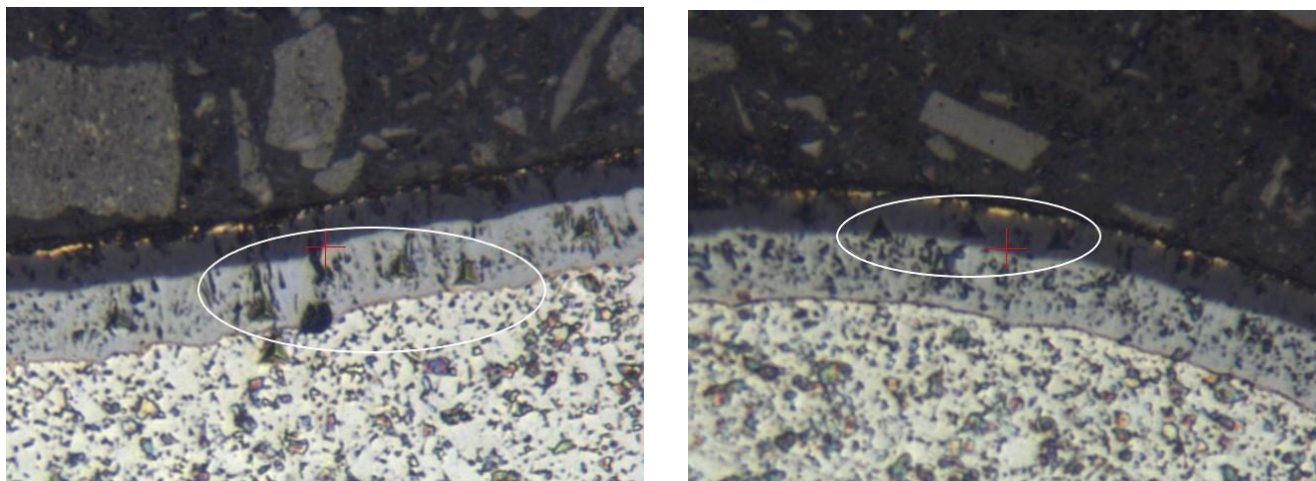


**Slika 35. Usporedba debljina prevlaka uzoraka 1 i 2**

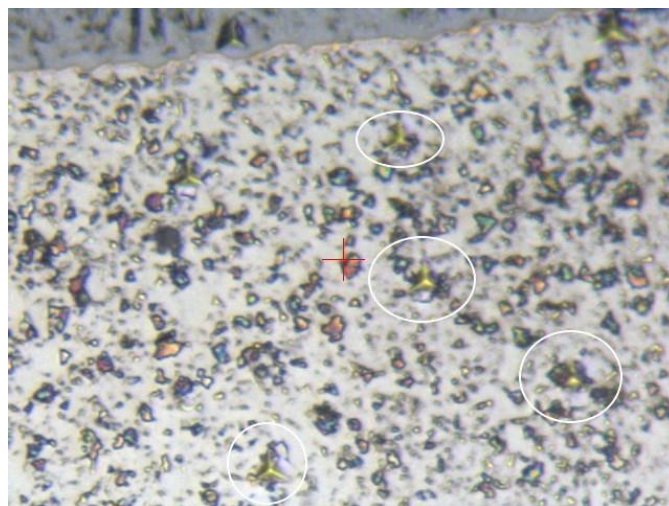
Slika 35. prikazuje razliku u debljini slojeva prevlaka. Uzorak 1 ima deblji potporni sloj, 13,2  $\mu\text{m}$  naspram 8,4  $\mu\text{m}$ , dok uzorak 2 ima deblji površinski sloj, 9,85  $\mu\text{m}$  naspram 6,4  $\mu\text{m}$ . Manja debljina potpornog sloja prevlake 2 može pridonijeti većoj adhezivnosti prevlake, dok deblji površinski sloj uzorka 2 može pridonijeti većoj otpornost na trošenje, što je potvrđeno u ispitivanju adhezivnosti prevlake te mjerenju tvrdoće.

#### 5.4. Mjerenje tvrdoće osnovnog materijala i prevlake

Nanoinstrumentiranom metodom utiskivanja izmjerene su tvrdoće prevlake i osnovnog materijala oba uzorka. Na svakom sloju prevlake i osnovnom materijalu uzoraka 1 i 2, napravljena su pet ispitivanja, od kojih su tri reprezentativna korištena u proračunu.



Slika 36. Vidljivi otisci indentora na slojevima prevlake uzorka 1



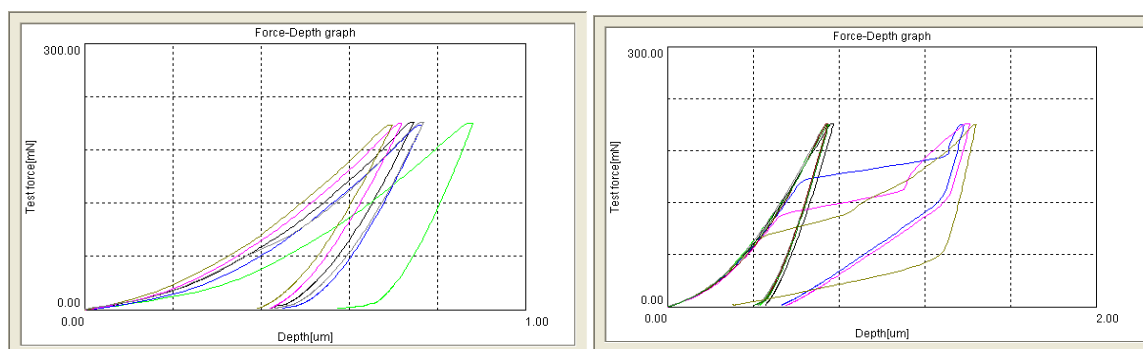
Slika 37. Vidljivi otisci indentora na osnovnom materijalu uzorka 1

**Tablica 3. Vrijednosti tvrdoće gornjeg sloja prevlake uzorka 1**

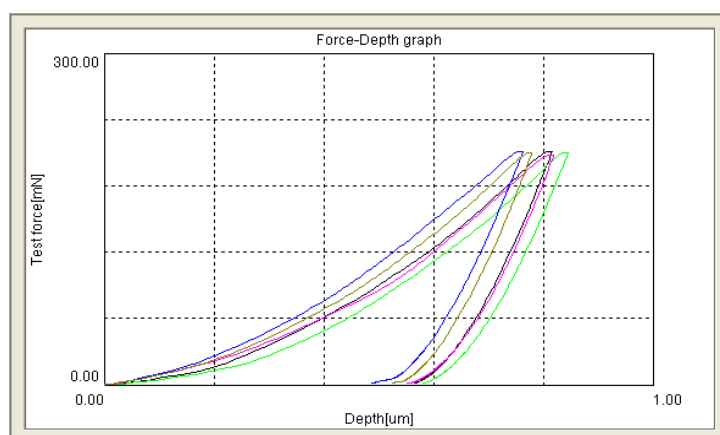
Uzorak	Fmax, mN	hmax, $\mu\text{m}$	HV
1	210,82	0,7758	2333,11
2	209,79	0,7473	2484,61
3	209,79	0,7522	2470,73
Srednja vr.	210,13	0,7584	2429,48

**Tablica 4. Vrijednosti tvrdoće donjeg sloja prevlake uzorka 1**

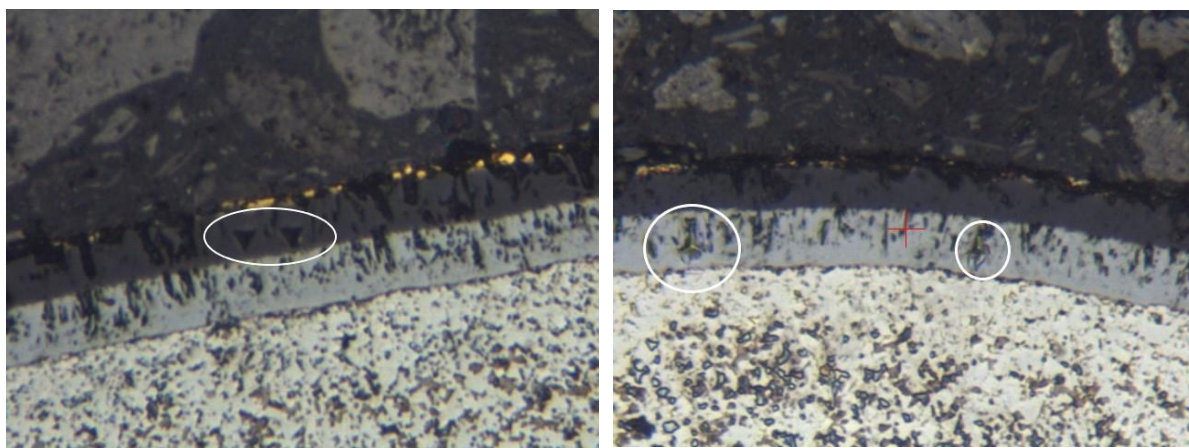
Uzorak	Fmax, mN	hmax, $\mu\text{m}$	HV
1	211,03	0,7472	2346,19
2	209,79	0,7195	2571,13
3	210,62	0,7689	2176,21
Srednja vr.	210,48	0,7452	2364,51

**Slika 38. Dijagrami sila-dubina ispitivanja slojeva prevlake uzorka 1****Tablica 5. Vrijednosti tvrdoće osnovnog materijala uzorka 1**

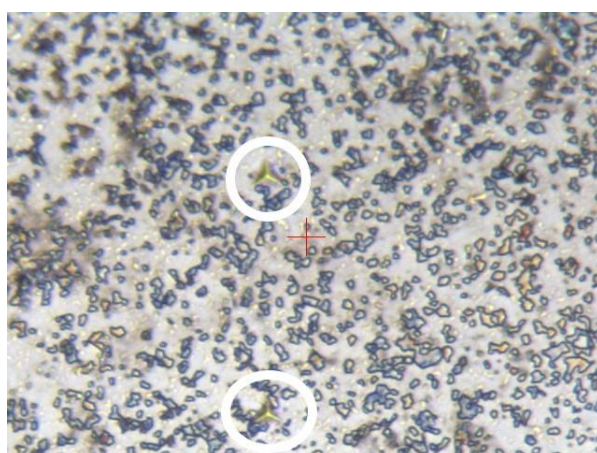
Uzorak	Fmax, mN	hmax, $\mu\text{m}$	HV
1	210,82	0,8159	1711,52
2	209,99	0,8456	1580,67
3	210,62	0,8195	1662,67
Srednja vr.	207,92	0,827	1651,62



**Slika 39. Dijagram sila-dubina ispitivanja osnovnog materijala uzorka 1**



**Slika 40. Vidljivi otisci indentora na slojevima prevlake uzorka 2**



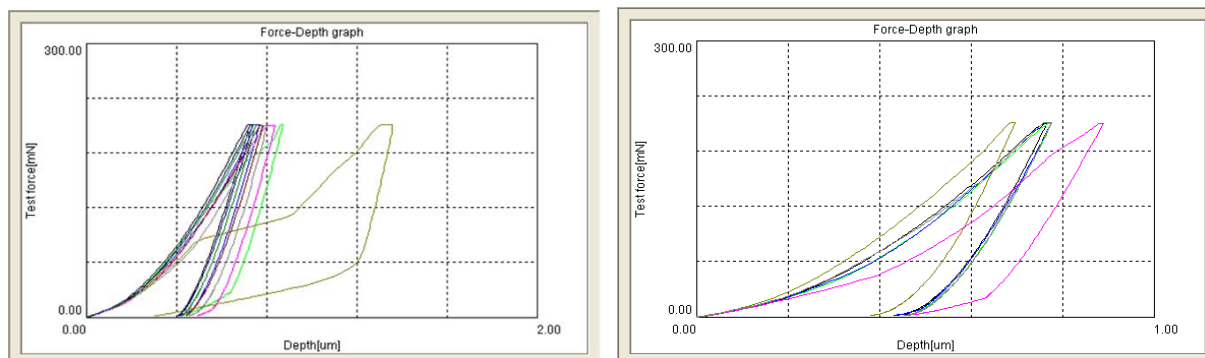
**Slika 41. Vidljivi otisci indentora na osnovnom materijalu uzorka 2**

**Tablica 6. Vrijednosti tvrdoće gornjeg sloja prevlake uzorka 2**

Uzorak	Fmax, mN	hmax, $\mu\text{m}$	HV
1	210,62	0,7266	2751,77
2	211,03	0,7534	2529,89
3	210,83	0,7383	2661,65
Srednja vr.	210,83	0,7394	2647,77

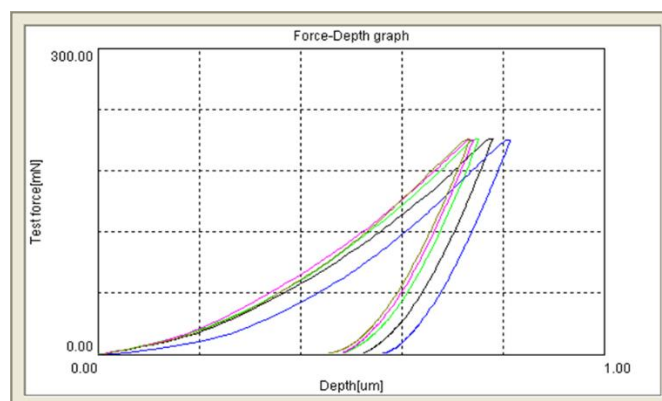
**Tablica 7. Vrijednosti tvrdoće donjeg sloja prevlake uzorka 2**

Uzorak	Fmax, mN	hmax, $\mu\text{m}$	HV
1	210,2	0,7664	2203,89
2	210	0,7761	2136,31
3	210,62	0,7755	2180,19
Srednja vr.	207,92	0,7727	2173,46

**Slika 42. Dijagram sila-dubina ispitivanja slojeva prevlake uzorka 2****Tablica 8. Vrijednosti tvrdoće osnovnog materijala uzorka 2**

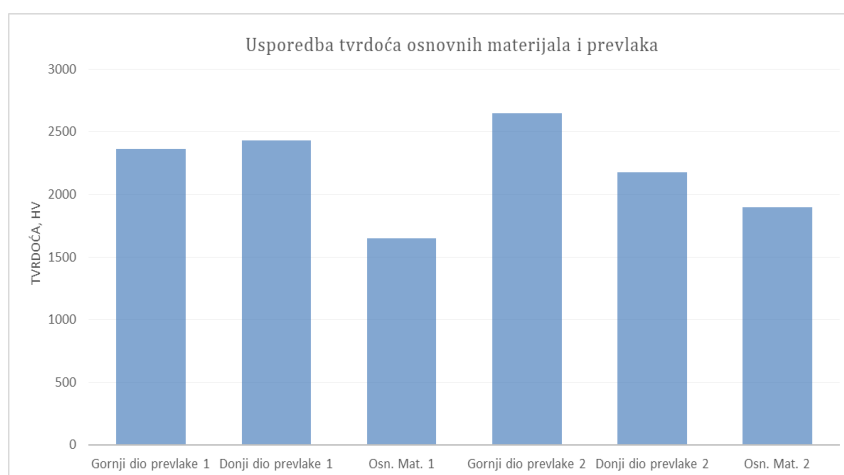
Uzorak	Fmax, mN	hmax, $\mu\text{m}$	HV
1	210,62	0,7802	1907,04
2	210,41	0,7517	2074,00
3	209,79	0,8149	1718,00
Srednja vr.	207,92	0,7823	1899,68





**Slika 43. Dijagram sila-dubina ispitivanja osnovnog materijala prevlake uzorka 2**

Na dijagramima sila-dubina (slike 38,39,42,43) vidljiva su dodatna mjerenja kojima je pravilno pozicioniran ciljnik indentacije. Na tim mjerenjima vidimo propadanje indentora koje je uzrokovano utiskivanjem indentora u polimernu masu. Mjerenja koja su korištena u radu pokazuju odsutstvo nepravilnosti te oscilacija u fazi držanja, prirasta sile i rasterećenja, što ukazuje na pravilno proveden postupak mjerenja tvrdoće. Iz tablica 3-8, izvučeni su bitni podaci odnosno vrijednosti tvrdoće za slojeve prevlake i osnovni materijal uzorka 1 i 2.



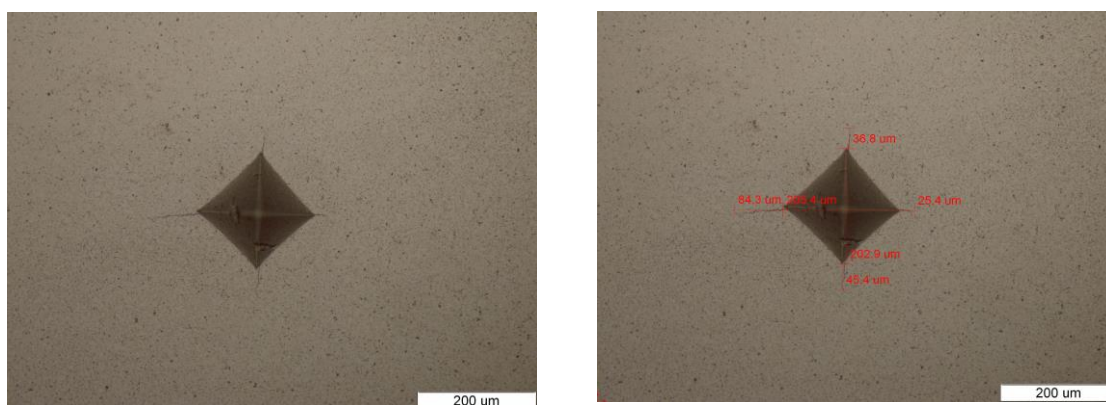
**Slika 44. Usporedba tvrdoće osnovnih materijala i prevlaka**

Na slici 44. prikazane su vrijednosti tvrdoća slojeva prevlake i osnovnog materijala uzorka 1 i 2. U eksploataciji je površinski sloj najveći nositelj otpornosti na trošenje. Kod uzorka 2 tvrdoća površinske prevlake viša je od tvrdoće površinske prevlake uzorka 1, što ukazuje na potencijalno veću otpornost na abrazijsko trošenje u odnosu na uzorak 1.

### 5.5. Mjerenje lomne žilavosti – Palmqvist metoda

Lomna žilavost ispitana je utiskivanjem pet otisaka u površinu svakog uzorka. Nakon utiskivanja uzorci se analiziraju pod svjetlosnim mikroskopom te su dobivene vrijednosti obrađene po formulama koje su istaknute u teoretskom dijelu rada.

Za svaki uzorak izmjerene su karakteristične duljine za pet otisaka, a to su dijagonale Vickersove piramide kao i duljine pukotina koje propagiraju iz vrhova piramide, opisano u teorijskom dijelu rada. Na slici 45. prikazani su reprezentativni primjeri otiska. Sve ukupno napravljeno je deset otisaka sa njihovim izmjerama, po pet na svakom uzorku.



Slika 45. Otisak indentacije Vickers, metoda Palmqvist

Tablica 9. Vrijednosti lomne žilavosti osnovnog materijala uzorka 1

Uzorak	l1, mm	l2, mm	l3, mm	l4, mm	T, mm	dsr, mm	Wg, N/mm	H, N/mm <sup>2</sup>	Wk, MPa*Vm
1	0,0254	0,0368	0,0843	0,0454	0,1919	0,2042	1533,09	13090,21	12,54
2	0,0354	0,0429	0,0607	0,0482	0,1872	0,2038	1571,58	13141,66	12,72
3	0,0221	0,0336	0,0661	0,0418	0,1636	0,2046	1798,29	13032,69	13,56
4	0,0315	0,0324	0,0473	0,0459	0,1571	0,2045	1872,69	13045,44	13,84
5	0,0373	0,0388	0,0476	0,0287	0,1524	0,2054	1930,44	12931,37	13,99
Srednja vr.	0,0303	0,0369	0,0612	0,0420	0,1704	0,2045	1741,22	13048,27	13,35

Tablica 10. Vrijednosti lomne žilavosti osnovnog materijala uzorka 2

Uzorak	l1, mm	l2, mm	l3, mm	l4, mm	T, mm	dsr, mm	Wg, N/mm	H, N/mm <sup>2</sup>	Wk, MPa*Vm
1	0,0850	0,0735	0,0754	0,0936	0,3275	0,1971	898,32	14050,52	9,95
2	0,0614	0,0712	0,0707	0,0869	0,2902	0,1989	1013,78	13790,37	10,47
3	0,0886	0,0679	0,0943	0,0709	0,3217	0,1977	914,52	13958,28	10,00
4	0,0769	0,0699	0,0802	0,0718	0,2988	0,1984	984,60	13866,95	10,35
5	0,0747	0,0680	0,0913	0,0689	0,3029	0,2036	971,30	13161,03	10,01
Srednja vr.	0,0773	0,0701	0,0824	0,0784	0,3082	0,1991	954,50	13765,43	10,15



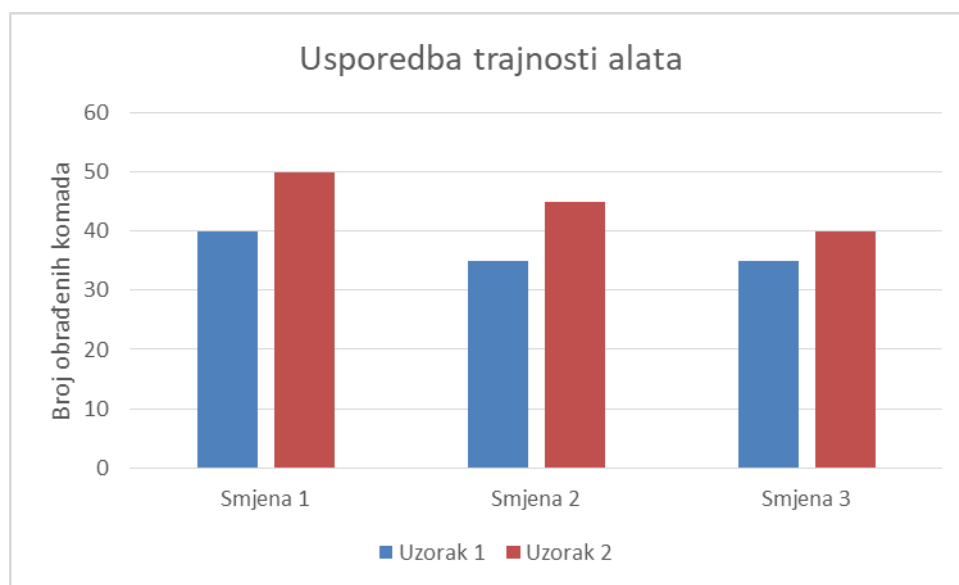
**Slika 46. Usporedba lomne žilavosti uzoraka 1 i 2**

Osnovni materijal uzorka 2 pokazuje veću vrijednost lomne žilavosti, odnosno otporniji je na pojavu pukotina u uvjetima udarnog opterećenja. Moguć razlog tome je veći udio kobalta u mikrostrukturi uzorka 2, utvrđen na metalografskoj analizi kao i mikrostruktura sitnijeg zrna. Budući da su alati kroz svoj životni vijek izloženi dinamičkom i udarnom opterećenju, uzorak 2 predstavlja bolji izbor ukoliko se izbor alata vrši po kriteriju otpornosti na pojavu loma.



### 5.6. Utvrđivanje trajnosti alata u eksploataciji

Podaci o trajanju alata prikupljeni su od strane radnika na CNC strojevima. Za svaki alat je prilikom rotacije vrha i izmjene alata od strane radnika, zapisan podatak o količini obrađenih komada koji su istaknuti na slici 47.



Slika 47. Usporedba trajnosti alata uzorka 1 i 2

Sa slike 47. vidljivo je da uzorak 2 u prosjeku ima 22 % veću trajnost od uzorka 1.

## 6. Zaključak

Nakon provedenih ispitivanja, zaključuje se sljedeće:

1. kod mjerenja debljine slojeva prevlake na alatu složene geometrije površine, u ovom slučaju nije bilo moguće potpuno provesti ispitivanje kalotestom odnosno potrošen je samo površinski sloj prevlake, koji debljinom odgovara debljini površinskog sloja prevlake utvrđenom analizom poprečnog presjeka,
2. prevlaka uzorka 1 ocijenjena je razredom adhezivnosti HF5, dok je prevlaka uzorka 2 ocijenjena razredom HF1, što upućuje na bolju adhezivnost prevlake na uzorku 2,
3. metalografskom analizom poprečnog presjeka utvrđeno je da mikrostruktura uzorka 2 kao i debljina slojeva prevlake na uzorku 2 boljih svojstava od uzorka 1. Tanki potporni sloj i deblji površinski sloj uzorka 2 u kombinaciji daju bolju otpornost na trošenje, dok mikrostruktura sitnijeg zrna povoljno utječe na žilavost,
4. mjerenjem tvrdoće slojeva prevlaka, ustanovljena je veća tvrdoća površinskog sloja uzorka 2, naspram uzorka 1, što potvrđuje tezu o većoj otpornosti na trošenje uzorka 2,
5. uzorak 2 pokazuje veću vrijednost lomne žilavosti naspram uzorka 1, što ukazuje na bolju otpornost od pojave loma u uvjetima udarnog opterećenja, koje se javlja u eksploataciji,
6. iz prikupljenih podataka o trajnosti alata u eksploataciji, vidljiva je veća trajnost uzorka 2, za 22 % u odnosu na uzorak 1.

Uzorak 2 je sa stajališta eksploatacijskih svojstava bolji u odnosu na uzorak 1. Za industrijsku primjenu bilo bi potrebno ispitati veću količinu novih i potrošenih reznih pločica u raznim uvjetima eksploatacije te dobivene podatke dovesti u vezu s cijenom i dobavljivošću reznih pločica.

---

**LITERATURA**

- [1] <https://www.americanmachinist.com/cutting-tools/manufacturing-expansion-drives-cutting-tool-consumption>
- [2] Š. Šavar, Obrada odvajanjem čestica 1.dio, Zagreb, 1977.
- [3] <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/pages/tools.aspx>
- [4] FSB. Podloge, Tehnologija 1, dio Obrada odvajanjem čestica, 2016.
- [5] T. A. Fabijanić, Razvoj referentnih pločica tvrdoće po Vickersu postupkom metalurgije praha, Doktorski rad, Zagreb, 2014.
- [6] D. Ćorić. Posebni metalni materijali – III dio, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [7] Filetin, K. Grilec, Postupci modificiranja i prevlačenja površina, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2004.
- [8] <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>
- [9] TRIBOtechnic Calotester User's Guide
- [10] N. Vidakis, A. Antoniadis, N. Bilalis. The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layered compounds, Grčka, 2003.
- [11] I. Čujić, Ž. Alar, Određivanje kontaktne površine indentora za instrumentiranu metodu mjerenja tvrdoće, Diplomski rad, Zagreb, 2018.
- [12] B. Renić, D. Ćorić, Tvrdoća i lomna žilavost nanostrukturiranog tvrdog metala, Završni rad, Zagreb, 2018.

---

## **PRILOZI**

I. CD-R disc